

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2002-352870
(P2002-352870A)

(43) 公開日 平成14年12月6日 (2002.12.6)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	サーチコード* (参考)
H 0 1 M 14/00		H 0 1 M 14/00	P 5 F 0 5 1
H 0 1 L 31/04		H 0 1 L 31/04	Z 5 H 0 3 2

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号 特願2001-160978(P2001-160978)

(22) 出願日 平成13年5月29日 (2001.5.29)

(71) 出願人 000003609
株式会社豊田中央研究所
愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番
地の1

(71) 出願人 000000011
アイシン精機株式会社
愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地

(72) 発明者 樋口 和夫
愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番
地の1 株式会社豊田中央研究所内

(74) 代理人 100088155
弁理士 長谷川 芳樹 (外3名)

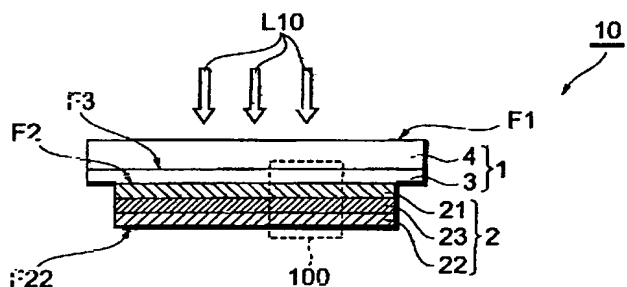
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光電極及びこれを備えた色素増感型太陽電池

(57) 【要約】

【課題】 優れた入射光吸収効率を有する光電極及び優れたエネルギー変換効率を有する色素増感型太陽電池の提供。

【解決手段】 光電極10は、受光面F2を有する半導体電極2と、受光面F2上に隣接して配置された透明電極1とを有する。そして、半導体電極2は複数の層から構成されており、複数の層の各層は酸化物半導体粒子で構成される多孔質膜からなり、各層における細孔径分布の最大値又は平均値が、透明電極に最も近い位置に配置される最内部の層21から透明電極に対して最も遠い位置に配置される最外部の層22にかけて増加していることを特徴とする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 受光面を有する半導体電極と、当該受光面上に隣接して配置された透明電極とを有する光電極であって、

前記半導体電極が複数の層から構成されており、

前記複数の層の各層は酸化物半導体粒子で構成される多孔質膜からなり、

前記各層における細孔径分布の最大値が、前記透明電極に最も近い位置に配置される最内部の層から前記透明電極に対して最も遠い位置に配置される最外部の層にかけて増加していること、を特徴とする光電極。

【請求項2】 前記最外部の層における細孔径分布の最大値が10～1000nmであり、かつ、

前記最外部の層における前記細孔径分布の最大値と前記最内部の層における前記細孔径分布の最大値との差が3～990nmであること、を特徴とする請求項1に記載の光電極。

【請求項3】 受光面を有する半導体電極と、当該受光面上に隣接して配置された透明電極とを有する光電極であって、

前記半導体電極が複数の層から構成されており、

前記複数の層の各層は酸化物半導体粒子で構成される多孔質膜からなり、

前記各層における細孔径分布の平均値が、前記透明電極に最も近い位置に配置される最内部の層から前記透明電極に対して最も遠い位置に配置される最外部の層にかけて増加していること、を特徴とする光電極。

【請求項4】 前記最外部の層における細孔径分布の平均値が10～500nmであり、かつ、

前記最外部の層における前記細孔径分布の平均値と前記最内部の層における前記細孔径分布の平均値との差が3～490nmであること、を特徴とする請求項3に記載の光電極。

【請求項5】 受光面を有する半導体電極と当該半導体電極の前記受光面上に隣接して配置された透明電極とを有する光電極と、対極とを有しており、前記半導体電極と前記対極とが電解質を介して対向配置された色素増感型太陽電池であって、

前記光電極が請求項1～4の何れかに記載の光電極であることを特徴とする色素増感型太陽電池。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、光電極及びこれを備えた色素増感型太陽電池に関する。

【0002】

【従来の技術】 近年、地球温暖化やエネルギー問題に対する関心の高まりとともに太陽電池の様々な開発が進められている。その太陽電池の中でも、色素増感型太陽電池は使用する材料が安価であること、比較的シンプルなプロセスで製造できること等からその実用化が期待され

ている。

【0003】そして、色素増感型太陽電池の実用化に向けて、光電極における光電変換効率を向上させ、電池のエネルギー変換効率を向上させるための様々な検討が行われている。なお、色素増感型太陽電池のエネルギー変換効率 η (%)は、下記式(1)で表される。また、下記式(1)中、 P_0 は入射光強度[mWcm⁻²]、 V_{oc} は開放電圧[V]、 I_{sc} は短絡電流密度[mAcm⁻²]、 F 、 F は曲線因子(Fill Factor)を示す。

$$\eta = 100 \times (V_{oc} \times I_{sc} \times F.F.) / P_0 \dots (1)$$

【0004】そこで、半導体電極は、通常、酸化物半導体粒子で構成される多孔質膜からなり、半導体電極における光電変換反応は上記多孔質膜中の増感色素粒子が吸着したサイトにおいてのみ進行することから、半導体電極内に含有される増感色素の吸着量を増加させることにより、光電極を構成する半導体電極における入射光の吸収効率の向上と、光電変換の反応効率の向上とを目指す検討がなされている。例えば、特開平11-144772号公報には、微細孔の孔径度分布が複数のピーク値を有する金属酸化物多孔質体から構成した半導体電極を備える色素増感型太陽電池が提案されている。この電池においては、半導体電極内に、細孔径が、例えば1nm以上10nm未満のミクロ孔と、細孔径が、例えば10～1000nmのマクロ孔とが混在した状態で形成されている。そして、半導体電極内に形成したミクロ孔により、半導体電極内における細孔(空隙)の比表面積を増大させて増感色素の吸着可能なサイトの十分な確保を行ない、同時に、半導体電極内に形成したマクロ孔により、増感色素を吸着させる際のミクロ孔へ供給する増感色素の供給量の十分な確保、或いは、電池の発電中における増感色素への反応物質(ヨウ化物イオンなどの還元剤)の供給量の十分な確保を行なうことを意図している。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】 しかしながら、本発明者らは、上記の特開平11-144772号公報の光電極を備えた色素増感型太陽電池であっても、半導体電極に形成したミクロ孔とマクロ孔のそれぞれに期待した効果が十分に得られておらず、従って、光電極を構成する半導体電極において十分な入射光の吸収効率を得られず、電池として十分なエネルギー変換効率を得ることができず未だ不十分であるということを見出した。

【0006】すなわち、上記特開平11-144772号に記載の色素増感型太陽電池は、ミクロ孔とマクロ孔とが半導体電極中においてそれぞれ均一に分布しているため、電極表面に分布するマクロ孔に比較して電極内部に分布するマクロ孔は、増感色素を吸着させる際の増感色素の効率のよい供給、或いは、電池の発電中における反応物質の効率のよい供給を行なうことに対して十分に寄与することができず、十分に利用できていなかった。

このように電極内部に十分に利用されていないマクロ孔が分布していると、その領域における増感色素の吸着密度が低下して光電変換効率が低下してしまう。

【0007】更に、電極表面に分布するミクロ孔においては、増感色素を吸着させる際にその細孔径が非常に小さいため増感色素の吸着速度が非常に遅くなり、電極表面に分布するミクロ孔のみならず、更に電極内部に存在するミクロ孔への増感色素の吸着量も不十分となっていた。そのため、電極表面に分布するミクロ孔のみならず該ミクロ孔の更に内部に存在する他の細孔も十分に利用できていなかった。また、電極表面に分布するミクロ孔はその細孔径が非常に小さいため、電池の発電中において電極内部に存在する細孔への電解質や反応物質の効率のよい供給ができなかった。そのため、この観点からも電極表面に分布するミクロ孔のみならず該ミクロ孔の更に内部に存在する他の細孔も十分に利用できていなかった。

【0008】本発明は、上記従来技術の有する課題に鑑みてなされたものであり、優れた光電変換効率を有する光電極及び優れたエネルギー変換効率を有する色素増感型太陽電池を提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明者らは、上記目的を達成すべく鋭意研究を重ねた結果、光電極を構成する半導体電極を少なくとも複数の層からなる構成とし、各層における細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値を、透明電極に最も近い位置に配置される層から透明電極に対して最も遠い位置に配置される層にかけて増加させることにより、増感色素の吸着量を十分に確保し、光電変換反応を効率よく進行させることが可能な電極構造を構築できることを見出し、本発明に到達した。

【0010】すなわち、本発明は、受光面を有する半導体電極と、当該受光面上に隣接して配置された透明電極とを有する光電極であって、半導体電極が複数の層から構成されており、複数の層の各層は酸化物半導体粒子で構成される多孔質膜からなり、各層における細孔径分布の最大値が、透明電極に最も近い位置に配置される最内部の層から透明電極に対して最も遠い位置に配置される最外部の層にかけて増加していること、を特徴とする光電極を提供する。

【0011】本発明の光電極は、半導体電極中の細孔径分布の最大値が半導体電極の受光面から半導体電極の電解質に接することになる面（以下、裏面という）にかけた半導体の厚み方向に沿って徐々に増加させた構造を有しているため、増感色素を半導体電極中に吸着させる際の増感色素の半導体電極中への拡散速度が向上するため、十分な量の増感色素を吸着させることが容易にできる。すなわち、半導体電極中の増感色素の吸着量を十分に確保することができる。

【0012】また、色素増感型太陽電池を構成した際に

は半導体電極の内部に存在する細孔中には該半導体電極の裏面の側から電解質溶液が注入されるが、半導体電極が上記の細孔構造を有しているため、半導体電極の内部に存在する細孔中における電解質溶液の拡散を容易かつ迅速に行うことが可能となる。そのため、発電中において、反応サイト（増感色素の吸着サイト）への反応物質の供給を迅速に行うことができるため、反応物質の拡散律速に基づく直流抵抗成分を従来よりも大きく低減することができる。すなわち、本発明の光電極は、光電変換反応を効率よく進行させることができ、優れた光電変換効率を得ることができる。

【0013】更に、半導体電極の内部に上記のような細孔構造を構築することは、太陽電池を製造する上で以下に示す点において有効である。

【0014】すなわち、半導体電極の内部に上記のような細孔構造を構築することにより、半導体電極の裏面の側からの（擬）固体電解質の注入が容易となる。そのため、半導体電極内での（擬）固体電解質の形成が容易になると共に、電極内での電解質や電子及び／又は正孔（ホール）の拡散が容易かつ迅速になるため、電池を構成した際の直流抵抗成分を低減することもできる。

【0015】ここで「（擬）固体電解質」とは、高分子ゲル化剤又は低分子ゲル化剤を電解質溶液又は電解質を含む溶融塩に添加したゲル状電解質を示す。例えば、電解質溶液に α -Val-Val-NH $C_{18}H_{37}$ をゲル化剤として加え加熱溶融体を多孔質半導体電極内に注入してゲル化させた電解質があげられる。なお、このゲル状電解質は化学ゲルでも物理ゲルでもかまわない。また、ゲル状電解質は通常使用される電解質溶液よりも粘度が高いが、本発明の光電極は前述の構造を有しているため、ゲル状電解質は電極中に容易に侵入することができ、この場合においても高い電池特性を得ることができる。

【0016】また、半導体電極の内部に上記のような細孔構造を構築することにより、多孔質の半導体電極内において高分子モノマーを重合させポリマー（高分子固体電解質）としたあと電解質成分を該ポリマー内に拡散させることも容易にできる。例えば、高分子モノマーとして2-(2-methoxy)ethyl acrylateと α -methacryloyl- ω -methoxyocta(oxyethylene)とを重合させ、得られたポリマー中にヨウ素系電解質を拡散させた電解質を用いることができる。

【0017】更に、半導体電極の内部に上記のような細孔構造を構築することにより、電極内部における高分子ならびに電解質の拡散が容易になるため、高分子として、例えば、poly(epichlorhydrin-co-ethylene oxide)とヨウ素系電解質を含む有機溶液を多孔質酸化物半導体電極に浸透させ、その後、溶媒を除去することにより半導体電極の内部に高分子固体電解質を導入することも容易にできる。

【0018】更に、半導体電極の内部に上記のような細

孔構造を構築することにより、半導体電極の内部へのp型半導体の拡散が容易となる。そのため、上述の電解質のかわりに、有機又は無機のp型半導体を半導体電極の内部に析出させることにより太陽電池を容易に作製することができる。例えば、ヨウ化銅(CuI)のアセトニトリル溶液を半導体電極に浸透させてその後溶媒を除去しCuIを析出させることができる。

【0019】ここで、本発明において、「各層における細孔径分布の最大値が、最内部の層から最外部の層にかけて増加している」状態とは、一端に位置する最外部の層の細孔径分布の最大値が他端に位置する最内部の層の細孔径分布の最大値よりも最終的に大きくなっており、複数の層を全体としてみた場合に各層の細孔径分布の最大値が最内部の層から最外部の層にかけて概略的に増加している状態を示す。

【0020】例えば、最内部の層から最外部の層にかけて細孔径分布の最大値が単調に増加している状態であってもよい。また、例えば、最内部の層と最外部の層との間に配置される層のうち、一部の隣り合う層同士の細孔径分布の最大値が同じ値をとる状態であってもよい。更に、最内部の層と最外部の層との間に配置される層のうち、一部の隣り合う層同士の細孔径分布の最大値を比較した場合、最内部の層の側に位置する層の細孔径分布の最大値が最外部の層の側に位置する層の細孔径分布の最大値よりも大きい場合があってもよい。ただし、半導体電極における光電変換反応をより効率よく進行させる観点から、最内部の層から最外部の層にかけて細孔径分布の最大値が単調に増加している状態、又は、最内部の層と最外部の層との間に配置される層のうち、一部の隣り合う層同士の細孔径分布の最大値が同じ値をとる状態が好ましい。

【0021】また、本発明の光電極においては、最外部の層における細孔径分布の最大値が10～1000nmであり、かつ、最外部の層における細孔径分布の最大値と最内部の層における細孔径分布の最大値との差が3～990nmであることが好ましい。これにより、半導体電極内における光電変換効率をより精密に向上させることができる。

【0022】ここで、最外部の層における細孔径分布の最大値が10nm未満であると、電極内への増感色素や電解質の拡散速度が極端に低下するおそれがある。一方、最外部の層における細孔径分布の最大値が1000nmを超えると、色素吸着量が極端に減少するために電池の特性が低下するおそれがある。また、最外部の層における細孔径分布の最大値と最内部の層における細孔径分布の最大値との差が3nm未満であると、前述の本発明における作用効果を十分に得ることが困難となり電池特性の十分な向上が得られないおそれがある。一方、この差が990nmを超えると、最外部の層の色素吸着量が極端に減少するために電池の特性が低下するおそれがある。

ある。

【0023】そして、上記と同様の観点から、最外部の層における細孔径分布の最大値は10～500nmであることがより好ましく12～300nmであることが更に好ましい。また、最外部の層における細孔径分布の最大値と最内部の層における細孔径分布の最大値との差は3～500nmであることがより好ましく5～300nmであることが更に好ましい。

【0024】また、本発明は、受光面を有する半導体電極と、当該受光面上に隣接して配置された透明電極とを有する光電極であって、半導体電極が複数の層から構成されており、複数の層の各層は酸化物半導体粒子で構成される多孔質膜からなり、各層における細孔径分布の平均値が、透明電極に最も近い位置に配置される最内部の層から透明電極に対して最も遠い位置に配置される最外部の層にかけて増加していること、を特徴とする光電極を提供する。

【0025】上記の細孔構造を有する半導体電極を備えた光電極も、前述の細孔構造を有する半導体電極を備えた光電極と同様に、優れた光線変換効率を得ることができる。

【0026】ここで、本発明において、「各層における細孔径分布の平均値が、最内部の層から最外部の層にかけて増加している」状態とは、前述の各層における細孔径分布の最大値の場合と同様に、一端に位置する最外部の層の細孔径分布の平均値が他端に位置する最内部の層の細孔径分布の平均値よりも最終的に大きくなっており、複数の層を全体としてみた場合に各層の細孔径分布の平均値が最内部の層から最外部の層にかけて概略的に増加している状態を示す。

【0027】この場合にも、前述の各層における細孔径分布の最大値の場合と同様に、例えば、最内部の層から最外部の層にかけて細孔径分布の平均値が単調に増加している状態であってもよい。また、例えば、最内部の層と最外部の層との間に配置される層のうち、一部の隣り合う層同士の細孔径分布の平均値が同じ値をとる状態であってもよい。更に、最内部の層と最外部の層との間に配置される層のうち、一部の隣り合う層同士の細孔径分布の平均値を比較した場合、最内部の層の側に位置する層の細孔径分布の平均値が最外部の層の側に位置する層の細孔径分布の平均値よりも大きい場合があってもよい。ただし、半導体電極における光電変換反応をより効率よく進行させる観点から、最内部の層から最外部の層にかけて細孔径分布の平均値が単調に増加している状態、又は、最内部の層と最外部の層との間に配置される層のうち、一部の隣り合う層同士の細孔径分布の平均値が同じ値をとる状態が好ましい。

【0028】また、この場合にも、前述の各層における細孔径分布の最大値の場合と同様の観点から、最外部の層における細孔径分布の平均値が10～500nmであ

り、かつ、最外部の層における細孔径分布の平均値と最内部の層における細孔径分布の平均値との差が3~490nmであることが好ましい。これにより、半導体電極内における光電変換効率をより精密に向上させることができる。そして、この場合にも、最外部の層における細孔径分布の平均値は12~300nmであることがより好ましく12~200nmであることが更に好ましい。また、最外部の層における細孔径分布の平均値と最内部の層における細孔径分布の平均値との差は3~300nmであることがより好ましく5~200nmであることが更に好ましい。

【0029】なお、本発明において、半導体電極の各層の細孔径分布の最大値或いは細孔径分布の平均値を求めるための細孔径分布曲線は、次に述べる方法により求めることができる。すなわち、各層を構成する多孔質膜と同様の多孔質材料を液体窒素温度（-196℃）に冷却して窒素ガスを導入し、定容量法あるいは重量法によりその吸着量を求め、次いで、導入する窒素ガスの圧力を徐々に増加させ、各平衡圧に対する窒素ガスの吸着量をプロットし、吸着等温線を得る。細孔径分布曲線は、この吸着等温線を用い、Cranston-Inklay法、Dollimore-Hearn法、BJH法等の計算法により求めることができる。また、水銀圧入法を用いて、高圧の水銀を試料の細孔内に圧入することにより細孔分布曲線を求めることもできる。

【0030】また、本発明は、受光面を有する半導体電極と当該半導体電極の受光面上に隣接して配置された透明電極とを有する光電極と、対極とを有しており、半導体電極と対極とが電解質を介して対向配置された色素増感型太陽電池であって、光電極が前述した本発明の光電極であることを特徴とする色素増感型太陽電池を提供する。このように、前述した本発明の光電極を用いることにより、優れたエネルギー変換効率を有する色素増感型太陽電池を構成することができる。

【0031】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照しながら本発明の光電極及び色素増感型太陽電池の好適な実施形態について詳細に説明する。なお、以下の説明では、同一または相当部分には同一符号を付し、重複する説明は省略する。

【0032】図1は、本発明の光電極の好適な一実施形態を示す模式断面図である。また、図2は、図1に示した領域100の部分の模式拡大断面図である。更に、図3は、図1に示した光電極を備えた色素増感型太陽電池を示す模式断面図である。

【0033】図1に示す光電極10は、主として、受光面F2を有する半導体電極2と、当該半導体電極2の受光面F2上に隣接して配置された透明電極1ととから構成されている。また、図3に示す色素増感型太陽電池20は、主として、図1に示した光電極10と、対極CE

と、スペーサーSにより光電極10と対極CEとの間に形成される間隙に充填された電解質Eとから構成されている。そして、半導体電極2は、受光面F2と反対側の裏面F22において電解質Eと接触している。

【0034】この色素増感型太陽電池20は、透明電極1を透過して半導体電極2に照射される光L10によって半導体電極2内において電子を発生させる。そして、半導体電極2内において発生した電子は、透明電極1に集められて外部に取り出される。

【0035】透明電極1の構成は特に限定されるものではなく、通常の色素増感型太陽電池に搭載される透明電極を使用できる。例えば、図1及び図3の透明電極1は、ガラス基板等の透明基板4の半導体電極2の側に光を透過させるためのいわゆる透明導電膜3をコートした構成を有する。この透明導電膜3としては、液晶パネル等に用いられる透明電極を用いればよい。例えば、フッ素ドーパSnO₂コートガラス、ITOコートガラス、ZnO:Alコートガラス等が挙げられる。また、メッシュ状、ストライプ状など光が透過できる構造にした金属電極をガラス基板等の基板4上に設けたものでもよい。

【0036】透明基板4としては、液晶パネル等に用いられる透明基板を用いてよい。具体的には透明なガラス基板、ガラス基板表面を適当に荒らすなどして光の反射を防止したもの、すりガラス状の半透明のガラス基板など光を透過するものが透明基板材料として挙げられる。なお、光を透過するものであれば材質はガラスでなくてもよく、透明プラスチック板、透明プラスチック膜、無機物透明結晶体などでもよい。

【0037】図1及び図2に示すように、半導体電極2は、酸化物半導体粒子で構成される多孔質膜からなる3つの層から構成されている。すなわち、半導体電極2は、透明電極1に最も近い位置に配置される最内部の層21と、透明電極1に対して最も遠い位置に配置される最外部の層22と、最内部の層21と最外部の層22との間に配置される内部層23とから構成されている。

【0038】そして、3つの層のそれぞれにおける細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値を比較すると、各層ごとの細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値は最内部の層21から最外部の層22にかけて増加している。この光電極10においては、上記の構造を有する半導体電極2を備えることにより、当該半導体電極2内における増感色素の十分な吸着量の確保と光電変換効率の向上が図られている。

【0039】ここで、3つの層のそれぞれの細孔構造が上記の細孔径分布の最大値の条件に従って形成されている場合、最外部の層22における細孔径分布の最大値は好ましくは10~1000nmとなるように調節されており、最外部の層における細孔径分布の最大値と最内部の層における細孔径分布の最大値との差は好ましくは3

～990 nmとなるように調節されている。

【0040】更に、3つの層のそれぞれの細孔構造が上記の細孔径分布の平均値の条件に従って形成されている場合、最外部の層22における細孔径分布の平均値は好ましくは10～500 nmとなるように調節されており、最外部の層における細孔径分布の平均値と最内部の層における細孔径分布の平均値との差は好ましくは3～490 nmとなるように調節されている。

【0041】各層ごとの細孔構造を上記の細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値の条件を満たすように調節する方法としては、各層を構成する酸化半導体粒子の平均粒径を調節する方法がある。また、その他の方法としては、後述するように半導体電極の各層を作製する際に、各層を形成するための酸化半導体粒子を含むスラリー又はペースト酸化半導体粒子以外の物質を所定量混入しておき、これを最終的に除去することにより上記の細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値の条件を満たす細孔（空隙）を形成する方法が挙げられる。

【0042】図2は、半導体電極2の各層を構成する酸化半導体粒子（P1及びP3）の粒径を制御することにより、各層ごとの細孔構造を上記の細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値の条件を満たすように調節した場合の一例を示している。以下、この場合について説明する。半導体電極2の各層を構成する酸化半導体粒子の粒径を調節する場合、各層ごとの酸化半導体粒子の平均粒径を最内部の層21から最外部の層22にかけて増加させることにより調節することができる。

【0043】このとき、先に述べた各層の細孔構造を構築する観点から、最外部の層22における酸化半導体粒子P3の平均粒径は50～500 nmであることが好ましく、80～300 nmであることがより好ましい。また、最外部の層22における酸化半導体粒子P3の平均粒径と最内部の層21における酸化半導体粒子P1の平均粒径との差は10～400 nmであることが好ましく、20～300 nmであることがより好ましい。

【0044】ここで、最外部の層における酸化半導体粒子の平均粒径が50 nm未満であると、細孔径が小さくなり電極内における電解質や増感色素の拡散速度が低下するおそれがある。一方、最外部の層における酸化半導体粒子の平均粒径が500 nmを超えると、電極内の増感色素量が減少し入射光吸収効率が低下するおそれがある。また、最外部の層における酸化半導体粒子の平均粒径と最内部の層における酸化半導体粒子の平均粒径との差が10 nm未満であると、細孔径の差が小さくなり電極内における電解質や増感色素の拡散速度が低下するおそれがある。一方、この差が400 nmを超えると、最外部の層における酸化半導体の平均粒径が大きくなり電極内の増感色素量が減少するおそれがある。

【0045】図2に示す半導体電極2の最内部の層21は、主として、平均粒径の小さな酸化半導体粒子P1

とこの酸化半導体粒子P1の表面に吸着された増感色素P2とから構成されている。また、内部層23及び最外部の層22は、主として、酸化半導体粒子P1と、この酸化半導体粒子P1よりも平均粒径の大きな酸化半導体粒子P3と、これら酸化半導体粒子P1及び酸化半導体粒子P3の表面に吸着された増感色素P2とから構成されている。

【0046】ここで、酸化半導体粒子P1の平均粒径は好ましくは5～100 nmとなるように調節されている。また、酸化半導体粒子P3の平均粒径は好ましくは100 nmよりも大きくなるように調節されている。そして、最外部の層22における酸化半導体粒子P1と酸化半導体粒子P3との含量に対する酸化半導体粒子P3の配合割合は、内部層23における酸化半導体粒子P1と酸化半導体粒子P3との含量に対する酸化半導体粒子P3の配合割合よりも大きくなるように調節されている。その結果、各層ごとの酸化半導体粒子の平均粒径は最内部の層21から最外部の層22にかけて増加することになる。なお、この光電極10の場合には、最内部の層21には、酸化半導体粒子P3は実質的に含有されていない。その結果、半導体電極2の各層の細孔径分布の最大値又は平均値が半導体電極2の受光面F2から半導体電極2の裏面F22にかけた半導体の厚み方向に沿って徐々に増加することになる。

【0047】上記酸化半導体粒子P1及び酸化半導体粒子P3は特に限定されるものではなく、公知の酸化半導体等を使用することができる。酸化半導体としては、例えば、 TiO_2 、 ZnO 、 SnO_2 、 Nb_2O_5 、 In_2O_3 、 WO_3 、 ZrO_2 、 La_2O_3 、 Ta_2O_5 、 SrTiO_3 、 BaTiO_3 等を用いることができる。

【0048】また、半導体電極2の第一の半導体層5及び第二の半導体層6に含有させる増感色素P2は特に限定されるものではなく、可視光領域および／または赤外光領域に吸収を持つ色素であればよい。この増感色素P2としては、金属錯体や有機色素等を用いることができる。金属錯体としては銅フタロシアニン、チタニルフタロシアニン等の金属フタロシアニン、クロロフィルまたはその誘導体、ヘミン、ルテニウム、オスミウム、鉄及び亜鉛の錯体（例えばシスージアネートビス（2,2'-ビピリジル-4,4'-ジカルボキシレート）ルテニウム（II））等が挙げられる。有機色素としては、メタルフリーフタロシアニン、シアニン系色素、メタロシアニン系色素、キサンテン系色素、トリフェニルメタン系色素等を用いることができる。

【0049】また、半導体電極2の厚みは、3～50 μm であることが好ましく、5～30 μm であることがより好ましく、6～18 μm であることが更に好ましい。半導体電極の厚みが3 μm 未満となると、色素吸着量が少なくなり光を有効に吸収できなくなる傾向が大きくなる。一方、半導体電極の厚みが50 μm を超えると、電

気抵抗が大きくなり半導体に注入されたキャリアの損失量が多くなるとともに、イオン拡散抵抗が増大して、光励起されて半導体への電子注入を果した後の色素に対する I^- からの電子注入によって I_3^- の対極への搬出が阻害され、電池の出力特性が低下する傾向が大きくなる。

【0050】また、対極CEは、特に限定されるものではなく、例えば、シリコン太陽電池、液晶パネル等に通常用いられている対極と同じものを用いてよい。例えば、前述の透明電極1と同じ構成を有するものであってもよく、透明電極1と同様の透明導電膜3上にPt等の金属薄膜電極を形成し、金属薄膜電極を電解質Eの側に向けて配置させるものであってもよい。また、透明電極1の透明導電膜3に白金を少量付着させたものであってもよく、白金などの金属薄膜、炭素などの導電性膜などであってもよい。

【0051】更に、電解質Eの組成も光励起され半導体への電子注入を果した後の色素を還元するための酸化還元種を含んでいれば特に限定されないが、 I^-/I_3^- 等の酸化還元種を含むヨウ素系レドックス溶液が好ましく用いられる。具体的には、 I^-/I_3^- 系の電解質はヨウ素のアンモニウム塩あるいはヨウ化リチウムとヨウ素を混合したものなどを用いることができる。その他、 Br^-/Br_3^- 系、キノン/ヒドロキノン系などのレドックス電解質をアセトニトリル、炭酸プロピレン、エチレンカーボネートなどの電気化学的に不活性な溶媒（およびこれらの混合溶媒）に溶かしたのも使用できる。

【0052】また、スペーサーSの構成材料は特に限定されるものではなく、例えば、シリカビーズ等を用いることができる。

【0053】次に、図1に示した光電極10及び図3に示した色素増感型太陽電池20の製造方法の一例について説明する。

【0054】まず、透明電極1を製造する場合は、ガラス基板等の基板4上に先に述べたフッ素ドーパ SnO_2 等の透明導電膜3をスプレーコートする等の公知の方法を用いて形成することができる。

【0055】次に、透明電極1の透明導電膜3上に半導体電極2の各層を形成する方法としては、例えば、以下の方法がある。すなわち、まず、酸化チタン等の半導体粒子P1を分散させた最内部の層21を形成するための分散液を調製する。この分散液の溶媒は水、有機溶媒、または両者の混合溶媒など酸化物半導体粒子P1を分散できるものなら特に限定されない。また、分散液中には必要に応じて界面活性剤、粘度調節剤を加えてもよい。次に、分散液を透明電極1の透明導電膜3上に塗布し、次いで乾燥する。このときの塗布方法としてはバーコート法、印刷法などを用いることができる。

【0056】そして、乾燥した後、空气中、不活性ガス或いは窒素中で加熱、焼成して半導体電極2の最内部の層21（多孔質半導体膜）を形成する。このときの焼成

温度は300～800℃が好ましい。焼成温度が300℃未満であると酸化物半導体粒子P1間の固着、基板への付着力が弱くなり十分な強度がでなくなるおそれがある。焼成温度が800℃を超えると酸化物半導体粒子P1間の固着が進み、半導体電極2（多孔質半導体膜）の表面積が小さくなるおそれがある。

【0057】次に、最内部の層21上に内部層23を形成する場合には、例えば、上記の最内部の層21を形成するための分散液に、所定量の酸化物半導体粒子P3を更に添加させた組成を有する分散液を調製する以外は、上述した最内部の層21を形成する方法と同様に内部層23を形成することができる。更に、内部層23上に最外部の層22を形成する場合にも、例えば、上記の最内部の層21を形成するための分散液に、所定量の酸化物半導体粒子P3を更に添加させた組成を有する分散液を調製する以外は、上述した最内部の層21を形成する方法と同様に内部層23上に最外部の層22を形成することができる。

【0058】次に、半導体電極2中に浸着法等の公知の方法により増感色素P2を含有させる。増感色素P2は半導体電極2に付着（化学吸着、物理吸着または堆積など）させることにより含有させる。この付着方法は、例えば色素を含む溶液中に半導体電極2を浸漬するなどの方法を用いることができる。この際、溶液を加熱し還流させるなどして増感色素の吸着、堆積を促進することができる。なお、このとき、色素の他に必要に応じて、銀等の金属やアルミナ等の金属酸化物を半導体電極2中に含有させてもよい。

【0059】なお、半導体電極2内に含まれる光電変換反応を阻害する不純物を除去する表面酸化処理を、各層それぞれの形成時毎、或いは、各層全てを形成した時などに公知の方法により適宜施してもよい。

【0060】また、透明電極1の透明導電膜3上に半導体電極2を形成する他の方法としては、以下の方法がある。すなわち、透明電極1の透明導電膜3上に TiO_2 等の半導体を膜状に蒸着させる方法を用いてもよい。透明導電膜3上に半導体を膜状に蒸着させる方法としては公知の方法を用いることができる。例えば、電子ビーム蒸着、抵抗加熱蒸着、スパッタ蒸着、クラスティオンビーム蒸着等の物理蒸着法を用いてもよく、酸素等の反応性ガス中で金属等を蒸発させ、反応生成物を透明導電膜3上に堆積させる反応蒸着法を用いてもよい。更に、反応ガスの流れを制御する等してCVD等の化学蒸着法を用いることもできる。

【0061】このようにして光電極10を作製した後は、公知の方法により対極CEを作製し、これと光電極10と、スペーサーSを図1に示すように組み上げて、内部に電解質Eを充填し、色素増感型太陽電池20を完成させる。

【0062】以上、本発明の好適な実施形態について説

明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではない。

【0063】例えば、上記の実施形態においては、各層ごとの細孔構造を上述の細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値の条件を満たすように調節する方法として、各層ごとの酸化物半導体粒子の平均粒径を最内部の層21から最外部の層22にかけて増加させることにより調節する方法を採用した場合について説明したが、本発明において、各層ごとの酸化物半導体粒子の平均粒径を最内部の層21から最外部の層22にかけて増加させる具体的な方法は上記の実施形態に特に限定されない。

【0064】例えば、半導体電極の複数の層の各層に平均粒径の異なる1種類の酸化物半導体粒子を含有させることにより調節してもよく、半導体電極の複数の層の各層毎にそれぞれ平均粒径の異なる少なくとも2種の酸化物半導体粒子を含有させることにより調節してもよく、半導体電極の複数の層の少なくとも1つの層に平均粒径の異なる少なくとも2種の酸化物半導体粒子を含有させることにより調節してもよい。

【0065】具体的には、例えば、図4に示すように、半導体電極2の最内部の層21にも酸化物半導体粒子P3が含まれており、各層における酸化物半導体粒子P1と酸化物半導体粒子P3との含量に対する酸化物半導体粒子P3の配合割合が、最内部の層21から最外部の層22にかけて増加している構成でもよい。

【0066】また、例えば、図5に示すように、半導体電極2の最外部の層22を構成する半導体材料が1種類の酸化物半導体粒子P3のみであり、最内部の層21を構成する半導体材料が1種類の酸化物半導体粒子P1のみであり、内部層23を構成する半導体材料が2種類の酸化物半導体粒子P1及びP3であってもよい。

【0067】更に、例えば、図6に示すように、半導体電極2の最内部の層21を構成する半導体材料が1種類の酸化物半導体粒子P1のみであり、内部層23を構成する半導体材料が1種類の酸化物半導体粒子P3のみであり、最外部の層22を構成する半導体材料が酸化物半導体粒子P3よりも大きな平均粒径を有する1種類の酸化物半導体粒子P4のみである構成でもよい。

【0068】例えば、上記の実施形態においては、3層の構造を有する半導体電極を備えた光電極及びこれを備える色素増感型太陽電池について説明したが、本発明の光電極及び色素増感型太陽電池はこれに限定されるものではない。例えば、本発明の光電極は、図7に示す光電極14のように、4層以上の層から構成された半導体電極2を備える構成を有していてもよい。例えば、図7に示す光電極14の半導体電極2は、最内部の層21と最外部の層22と、最内部の層21と最外部の層22との間に配置される内部層23及び24とから構成されている。そして、この場合、半導体電極2の4つの層のそれぞれにおける細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均

値が最内部の層21から最外部の層22にかけて増加するように調節されている。また、2層の構造を有する半導体電極（図示せず）を備える構成を有していてもよい。

【0069】また、上記の実施形態においては、半導体電極の各層ごとの細孔構造を前述の細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値の条件を満たすように調節する方法として、各層を構成する酸化物半導体粒子の粒径を調節する方法を用いる場合について説明したが、本発明において、半導体電極の各層ごとの細孔構造を前述の細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値の条件を満たすように調節する方法は特に限定されるものではない。

【0070】各層を構成する酸化物半導体粒子の平均粒径を調節する方法の他の方法としては、半導体電極の各層を作製する際に、各層を形成するための酸化物半導体粒子を含むスラリー又はペースト酸化物半導体粒子以外の物質を所定量混入しておき、これを最終的に除去することにより上記の細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値の条件を満たす細孔（空隙）を形成する方法が挙げられる。

【0071】このような細孔を形成する方法としては、より具体的には、例えば、半導体電極を作製する方法として各層の酸化物半導体膜を形成するための酸化物半導体粒子を含むスラリー又はペーストを透明電極等に塗布又は印刷し、その後、乾燥させて更に熱処理する方法を用いる場合に、スラリー又はペースト中に、熱処理により酸化反応等を進行させて除去することができる物質（例えば、ポリエチレングリコール等の有機物）を添加しておき、これを熱処理により除去する方法がある。この場合、熱処理により除去することができる物質の添加量を調節することにより、半導体電極の各層ごとの細孔径分布を制御することができる。

【0072】また、他の細孔を形成する方法として、上述の半導体電極の作製方法を用いる場合に、熱処理により除去することができる物質のかわりに熱処理では除去できない物質を上述のスラリー又はペーストに所定量添加しておき、熱処理した後の半導体電極から除去する方法もある。具体的には、例えば、塩化カリウム、塩化ナトリウムなどの塩類を上述のスラリー又はペーストに添加しておき、熱処理後に水で塩類を溶出させる方法がある。更に、他の細孔を形成する方法として、上述の半導体電極の作製方法を用いる場合に、酸やアルカリなどにより溶出できる微粒子を所定量添加しておき、熱処理後に該微粒子を除去する方法もある。

【0073】また、他の細孔を形成する方法として、半導体電極を作製した後或いは半導体電極の各層を作製する度ごとに、半導体電極の各層を構成する酸化物半導体の一部を溶解等によって除去する方法もある。この場合の除去方法としては、例えば、酸化剤を含む溶液で酸化物半導体の一部を溶解させる方法がある。また、酸化剤

を含む溶液を用いるかわりに、半導体電極の各層を構成する酸化物半導体の一部を溶液中で電気化学的に溶解させる方法、又は、半導体電極の各層を構成する酸化物半導体の一部を光を照射した溶液中で光電気化学的に溶解させる方法がある。

【0074】このような細孔を形成する方法を用いることにより、例えば、図8に示すように、最内部の層21と最外部の層22とを有する光電極を構成することができる。すなわち、図8に示す半導体電極2の最内部の層21及び最外部の層22は、ともに増感色素P2が吸着した1種類の酸化物半導体粒子P1のみで構成されているが、最内部の層21中の酸化物半導体粒子P1間に形成される細孔（空隙）部分R21の大きさが、最外部の層22中の酸化物半導体粒子P1間に形成される細孔（空隙）部分R22の大きさよりも小さくなるように形成されている。ここで、この場合にも半導体電極2は3層以上の構成を有していてもよい。

【0075】なお、本発明において上述した各層ごとの細孔構造を上述の細孔径分布の最大値又は細孔径分布の平均値の条件を満たすように調節する方法は任意に組み合わせることもできる。

【0076】

【実施例】以下、実施例及び比較例を挙げて本発明の光電極及び色素増感型太陽電池について更に詳しく説明するが、本発明はこれらの実施例に何ら限定されるものではない。

【0077】（実施例1）以下に示す手順により、図1に示した光電極10と同様の構成を有する光電極を作製し、更に、この光電極を用いて図3に示した色素増感型太陽電池20と同様の構成を有する5×20mmのスクールの色素増感型太陽電池を作製した。

【0078】オートクレーブ内に、Tiを含む化学種（チタンアルコキシド）、イオン交換水、pH調整剤（硝酸、アンモニア等）を入れ、所定の反応条件下において、Tiを含む化学種の加水分解反応を進行させ、次いで、得られるTiO₂粒子の結晶化を進行させることにより、平均粒径が27nmのTiO₂粒子（アナターゼ、以下、P27という）を含むコロイド溶液（以下、コロイド溶液1という）を調製した。次に、オートクレーブ内における反応条件を変えたこと以外は上記コロイド溶液1と同様の手順により、平均粒径が56nmのTiO₂粒子（アナターゼ、以下、P56という）を含むコロイド溶液（以下、コロイド溶液2という）、平均粒径が112nmのTiO₂粒子（アナターゼ、以下、P112という）を含むコロイド溶液（以下、コロイド溶液3という）、平均粒径が198nmのTiO₂粒子（アナターゼ、以下、P198という）を含むコロイド溶液（以下、コロイド溶液4という）を調製した。なお、これらのコロイド溶液1～4に含まれるTiO₂粒子の平均粒径は、光散乱光度計（大塚電子社製）を用い

て、レーザー光の動的光散乱を解析することにより求めた。

【0079】次に、コロイド溶液1～4のそれぞれに対して溶媒希釈や溶媒除去を施すことによりTiO₂粒子の濃度を調製し、更に、セルロース系の粘度調整剤を加えることにより以下に示すペーストを調製した。

【0080】すなわち、コロイド溶液1及びコロイド溶液4を使用してP27とP198との質量比をP27：P198=7：3としたペースト（以下、ペースト1という）、コロイド溶液1及びコロイド溶液4を使用してP27とP198との質量比をP27：P198=1：1としたペースト（以下、ペースト2という）コロイド溶液1及びコロイド溶液4を使用してP27とP198との質量比をP27：P198=3：7としたペースト（以下、ペースト3という）を調製した。

【0081】一方、ガラス基板4（透明導電性ガラス）上にフッ素ドーパされたSnO₂導電膜3（膜厚：700nm）を形成した透明電極1（厚さ：1.1mm）を準備した。そして、ペースト1を最内部の層21の形成に用い、ペースト2を内部層23の形成に用い、ペースト3を最外部の層22の形成に用いた。すなわち、このSnO₂導電膜3上に、上述のペースト1をスクリーン印刷し、次いで乾燥させた。その後、大気中、450℃の条件のもとで30分間焼成した。更に、ペースト2及びペースト3を用いてこのスクリーン印刷と焼成とを繰り返すことにより、SnO₂導電膜上に図1に示す半導体電極2と同様の構成の半導体電極を形成し、増感色素を含有していない光電極を作製した。

【0082】なお、この半導体電極について、受光面の面積；1.0cm²、半導体電極の厚さ；12μm、最内部の層21の層厚；4μm、内部層23の層厚；4μm、最外部の層22の層厚；4μmであり、最内部の層21内の細孔径分布の最大値；12nm、最内部の層21内の細孔径分布の平均値；14nm、内部層23内の細孔径分布の最大値；14nm、内部層23内の細孔径分布の平均値；17nm、最外部の層内の細孔径分布の最大値；30nm、最外部の層内の細孔径分布の平均値；30nmであった。

【0083】ここで、半導体電極の各層内の細孔径分布は以下のようにして測定した。すなわち、同一条件で塗布（スクリーン印刷）して更に熱処理した後の半導体電極の各層を構成する多孔質の酸化物半導体膜を削り落として粉末としたものを試料とし、ガス吸着測定装置（Quantachrome社製、「AUTOSORB」）を用いて窒素吸着法によりこの試料に関する等温吸着線を得て、BJH法で計算し求めた。なお、異なる構造の層を積層した場合も各層をダイヤモンド砥石などで平面研削し、各層ごとの粉末を回収して同様に測定・解析して細孔径分布曲線を求めた。

【0084】次に、上記の半導体電極の裏面を酸化処理

した。その後、半導体電極の裏面に色素を以下のようにして吸着させた。まず、増感色素としてルテニウム錯体[*cis*-Di(thiocyanato)-N,N'-bis(2,2'-bipyridyl-4,4'-dicarboxylic acid)-ruthenium(II)]を用い、これのエタノール溶液(増感色素の濃度; $3 \times 10^{-4} \text{mol/L}$)を調製した。次に、この溶液に半導体電極を浸漬し、80℃の温度条件のもとで20時間放置した。これにより、半導体電極2の内部に増感色素を約 $1.0 \times 10^{-7} \text{mol/cm}^2$ 吸着させた。次に、開放電圧 V_{oc} を向上させるために、ルテニウム錯体吸着後の半導体電極を4-tert-ブチルピリジンのアセトニトリル溶液に15分浸漬した後、25℃に保持した窒素気流中において乾燥させ、光電極12を完成させた。

【0085】(実施例2)半導体電極の製造を以下のようにして行ったこと以外は、実施例1と同様の手順により図1に示した光電極10及び図3に示した色素増感型太陽電池20と同様の構成を有する光電極及び色素増感型太陽電池を作製した。

【0086】すなわち、実施例1において調製したコロイド溶液1及びコロイド溶液3を使用してP27とP112との質量比をP27:P112=7:3としたペースト(以下、ペースト4という)、コロイド溶液1及びコロイド溶液3を使用してP27とP112との質量比をP27:P112=1:1としたペースト(以下、ペースト5という)、コロイド溶液1及びコロイド溶液3を使用してP27とP112との質量比をP27:P112=3:7としたペースト(以下、ペースト6という)、を調製した。

【0087】そして、ペースト4を最内部の層21の形成に用い、ペースト5を内部層23の形成に用い、ペースト6を最外部の層22の形成に用いたこと以外は、実施例1と同様手順により、透明電極1上に図1に示す半導体電極2と同様の構成の半導体電極を形成した。

【0088】なお、この半導体電極について、受光面の面積; 1.0cm^2 、半導体電極の厚さ; $12 \mu\text{m}$ 、最内部の層21の層厚; $4 \mu\text{m}$ 、内部層23の層厚; $4 \mu\text{m}$ 、最外部の層22の層厚; $4 \mu\text{m}$ であり、最内部の層21内の細孔径分布の最大値; 10nm 、最内部の層21内の細孔径分布の平均値; 12nm 、内部層23内の細孔径分布の最大値; 13nm 、内部層23内の細孔径分布の平均値; 18nm 、最外部の層内の細孔径分布の最大値; 21nm 、最外部の層内の細孔径分布の平均値; 22nm であった。

【0089】(実施例3)半導体電極の製造を以下のようにして行ったこと以外は、実施例1と同様の手順により図1に示した光電極10及び図3に示した色素増感型太陽電池20と同様の構成を有する光電極及び色素増感型太陽電池を作製した。

【0090】すなわち、実施例1において調製したコロイド溶液2及びコロイド溶液4を使用してP56とP1

98との質量比をP56:P198=7:3としたペースト(以下、ペースト7という)、コロイド溶液1及びコロイド溶液3を使用してP56とP198との質量比をP56:P198=1:1としたペースト(以下、ペースト8という)、コロイド溶液1及びコロイド溶液3を使用してP56とP198との質量比をP56:P198=3:7としたペースト(以下、ペースト9という)、を調製した。

【0091】そして、ペースト7を最内部の層21の形成に用い、ペースト8を内部層23の形成に用い、ペースト9を最外部の層22の形成に用いたこと以外は、実施例1と同様手順により、透明電極1上に図1に示す半導体電極2と同様の構成の半導体電極を形成した。

【0092】なお、この半導体電極について、受光面の面積; 1.0cm^2 、半導体電極の厚さ; $12 \mu\text{m}$ 、最内部の層21の層厚; $4 \mu\text{m}$ 、内部層23の層厚; $4 \mu\text{m}$ 、最外部の層22の層厚; $4 \mu\text{m}$ であり、最内部の層21内の細孔径分布の最大値; 29nm 、最内部の層21内の細孔径分布の平均値; 31nm 、内部層23内の細孔径分布の最大値; 41nm 、内部層23内の細孔径分布の平均値; 42nm 、最外部の層内の細孔径分布の最大値; 52nm 、最外部の層内の細孔径分布の平均値; 54nm であった。

【0093】(実施例4)実施例1において調製したコロイド溶液1に8質量%のポリエチレングリコール(平均分子量; 20000)を添加したスラリー(以下、スラリー1という)を調製した。同様に、コロイド溶液1に25質量%のポリエチレングリコールを添加したスラリー(以下、スラリー2という)と、40質量%のポリエチレングリコールを添加したスラリー(以下、スラリー3という)を調製した。

【0094】そして、スラリー1をバーコート法で透明電極1上に塗布し、乾燥させた後に450℃で焼成し最内部の層21を形成した。次に、スラリー2を内部層23の形成に用いるとともに、スラリー3を最外部の層22の形成に用いて最内部の層21の形成と同様の手順により、内部層23と最外部の層22とを形成した。

【0095】そして、実施例1と同様の手順により、透明電極1上に図1に示す半導体電極2と同様の構成の半導体電極を形成した。なお、この半導体電極について、受光面の面積; 1.0cm^2 、半導体電極の厚さ; $12 \mu\text{m}$ 、最内部の層21の層厚; $4 \mu\text{m}$ 、内部層23の層厚; $4 \mu\text{m}$ 、最外部の層22の層厚; $4 \mu\text{m}$ であり、最内部の層21の細孔径分布の最大値; 10nm 、最内部の層21内の細孔径分布の平均値; 12nm 、内部層23の細孔径分布の最大値; 18nm 、内部層23内の細孔径分布の平均値; 20nm 、最外部の層の細孔径分布の最大値; 26nm 、最外部の層22内の細孔径分布の平均値; 29nm であった。

【0096】(実施例5)実施例1において調製したコ

ロイド溶液1とコロイド溶液4を使用してP27:P198=5:5とした溶液に8質量%のポリエチレングリコール（平均分子量；20000）を添加したスラリー（以下、スラリー4という）を調製した。同様に、上記のコロイド溶液に25質量%のポリエチレングリコールを添加したスラリー（以下、スラリー5という）と、40質量%のポリエチレングリコールを添加したスラリー（以下、スラリー6という）を調製した。

【0097】そして、スラリー4をバーコート法で透明電極1上に塗布し、乾燥させた後に450℃で焼成し最内部の層21を形成した。次に、スラリー5を内部層23の形成に用いるとともに、スラリー6を最外部の層22の形成に用いて最内部の層21の形成と同様の手順により、内部層23と最外部の層22とを形成した。

【0098】そして、実施例1と同様の手順により、透明電極1上に図1に示す半導体電極2と同様の構成の半導体電極を形成した。なお、この半導体電極について、受光面の面積；1.0cm²、半導体電極の厚さ；12μm、最内部の層21の層厚；4μm、内部層23の層厚；4μm、最外部の層22の層厚；4μmであり、最内部の層21の細孔径分布の最大値；18nm、最内部の層21内の細孔径分布の平均値；22nm、内部層23の細孔径分布の最大値；27nm、内部層23内の細孔径分布の平均値；34nm、最外部の層22の細孔径分布の最大値；39nm、最外部の層22内の細孔径分布の平均値；45nmであった。

【0099】（実施例6）実施例4において調製したスラリー1をバーコート法で透明電極1上に塗布し、乾燥させた後に450℃で焼成し最内部の層21を形成した。次に、スラリー3を最外部の層22の形成に用いて最内部の層21の形成と同様の手順により最外部の層22を形成した。

【0100】そして、実施例1と同様の手順により、透明電極1上に図8に示した半導体電極2と同様の構成の半導体電極を形成した。なお、この半導体電極について、受光面の面積；1.0cm²、半導体電極の厚さ；8μm、最内部の層21の層厚；4μm、最外部の層22の層厚；4μmであり、最内部の層21の細孔径分布の最大値；10nm、最内部の層21内の細孔径分布の平均値；12nm、最外部の層22の細孔径分布の最大値；26nm、最外部の層22内の細孔径分布の平均値；29nmであった。

【0101】（実施例7）実施例5において調製したスラリー4をバーコート法で透明電極1上に塗布し、乾燥させた後に450℃で焼成し最内部の層21を形成した。次に、スラリー6を最外部の層22の形成に用いて最内部の層21の形成と同様の手順により最外部の層22を形成した。

【0102】そして、実施例1と同様の手順により、透明電極1上に図8に示した半導体電極2と同様の構成の

半導体電極を形成した。なお、この半導体電極について、受光面の面積；1.0cm²、半導体電極の厚さ；8μm、最内部の層21の層厚；4μm、最外部の層22の層厚；4μmであり、最内部の層21の細孔径分布の最大値；18nm、最内部の層21内の細孔径分布の平均値；22nm、最外部の層22の細孔径分布の最大値；39nm、最外部の層22内の細孔径分布の平均値；45nmであった。

【0103】（比較例1）実施例1において調製したコロイド溶液1のみを用いてP27のみを含むペースト（以下、ペースト10という）を調製し、ペースト10のみを用いて1つの層のみからなる半導体電極（受光面の面積；1.0cm²、層厚；12μm）を作製したこと以外は、実施例1と同様の手順により光電極及び色素増感型太陽電池を作製した。なお、この場合、ペースト1の透明電極1上への印刷、乾燥、焼成は3回繰り返すことにより行った。

【0104】（比較例2）実施例1に用いたペースト2のみを用いて1つの層のみからなる半導体電極（受光面の面積；1.0cm²、層厚；12μm）を作製したこと以外は、実施例1と同様の手順により光電極及び色素増感型太陽電池を作製した。なお、この場合、ペースト2の透明電極1上への印刷、乾燥、焼成は3回繰り返すことにより行った。

【0105】（比較例3）実施例4に用いたスラリー1のみを用いて実施例4と同様の手順により1つの層のみからなる半導体電極（受光面の面積；1.0cm²、半導体電極の厚さ；12μm）を作製したこと以外は、実施例1と同様の手順により光電極及び色素増感型太陽電池を作製した。なお、この場合、スラリー1の透明電極1上への塗布、乾燥、焼成は3回繰り返すことにより行った。

【0106】（比較例4）実施例5に用いたスラリー4のみを用いて実施例4と同様の手順により1つの層のみからなる半導体電極（受光面の面積；1.0cm²、半導体電極の厚さ；12μm）を作製したこと以外は、実施例1と同様の手順により光電極及び色素増感型太陽電池を作製した。なお、この場合、スラリー1の透明電極1上への塗布、乾燥、焼成は3回繰り返すことにより行った。

【0107】（比較例5）実施例4に用いたスラリー1のみを用いて実施例4と同様の手順により1つの層のみからなる半導体電極（受光面の面積；1.0cm²、半導体電極の厚さ；8μm）を作製したこと以外は、実施例1と同様の手順により光電極及び色素増感型太陽電池を作製した。なお、この場合、スラリー1の透明電極1上への塗布、乾燥、焼成は2回繰り返すことにより行った。

【0108】（比較例6）実施例5に用いたスラリー4のみを用いて実施例4と同様の手順により1つの層のみからなる半導体電極（受光面の面積；1.0cm²、半導体電極の厚さ；8μm）を作製したこと以外は、実施例1と同様の手順により光電極及び色素増感型太陽電池を作

製した。なお、この場合、スラリー4の透明電極1上への塗布、乾燥、焼成は2回繰り返すことにより行った。

【0109】[光電極の半導体電極内への増感色素の飽和吸着時間の測定試験] 実施例1～実施例7、比較例1～比較例6の各色素増感型太陽電池に備えられる光電極について、半導体電極内に増感色素を吸着させる際の飽和吸着時間の測定を行なった。得られた試験の結果を表1に示す。なお、飽和吸着時間の測定は、以下の手順に従い行った。すなわち、まず、増感色素を25℃で所定時間吸着させた後、色素が溶出可能な所定量の溶液に浸し吸着した色素を溶出させた。次に、この色素溶液の吸光スペクトルを測定し、この吸光度が一定となった時間をもって増感色素の飽和吸着時間とした。

【0110】

【表1】

	増感色素の 飽和吸着時間 /h
実施例1	20
実施例2	28
実施例3	10
実施例4	24
実施例5	15
実施例6	18
実施例7	12
比較例1	192
比較例2	48
比較例3	216
比較例4	36
比較例5	118
比較例6	30

【0111】実施例1～実施例7の色素増感型太陽電池に備えられる光電極の半導体電極は、増感色素を飽和吸着させる際の時間をそれぞれに対応する比較例1～比較例6の色素増感型太陽電池に備えられる光電極の半導体電極よりも短縮できることが確認された。

【0112】[電池特性試験] 電池特性試験を行ない、実施例1～実施例7、比較例1～比較例6の色素増感型太陽電池のエネルギー変換効率 η を測定した。電池特性試験は、ソーラーシミュレータ（ワコム製、商品名：「WXS-85-H型」）を用い、AMフィルター（AM-1.5）を通したキセノンランプから100mW/cm²の疑似太陽光を照射することにより行った。I-Vテスターを用いて電流-電圧特性を測定し、漏れ電流（I/mA cm⁻²）開放電圧（V_{oc}/V）、短絡電流（I_{sc}/mA cm⁻²）、曲線因子（F.F.）及びエネルギー変換効率（ η /％）を求めた。

【0113】そして、各電池について、照射強度を100mW/cm²としたときに計測されるエネルギー変換効率値 η_1 を減光フィルタを用いて照射強度を50mW/cm²としたときに計測されるエネルギー変換効率値 η_2 （％）で除した値を効率比 η_1/η_2 として求めた。なお、この比が1に近いほど電極内における電解質の拡散性に優れた高性能の太陽電池となる。

【0114】実施例1～実施例7、比較例1～比較例6の各色素増感型太陽電池について得られた電池特性試験の結果を表2に示す。

【0115】

【表2】

	エネルギー変換効率 η_1 /％ at 100mW/cm ²	エネルギー変換効率 η_2 /％ at 50mW/cm ²	効率比 η_1/η_2
実施例1	7.04	7.07	1.00
実施例2	7.07	7.14	0.99
実施例3	7.25	7.28	1.00
実施例4	6.85	6.98	0.98
実施例5	7.10	7.12	1.00
実施例6	6.91	6.93	1.00
実施例7	7.03	7.06	1.00
比較例1	4.86	5.58	0.87
比較例2	5.49	5.97	0.92
比較例3	4.70	5.73	0.82
比較例4	5.10	5.66	0.90
比較例5	4.60	5.41	0.85
比較例6	4.85	5.27	0.92

【0116】表2に示した結果から明らかなように、実施例1～実施例7の色素増感型太陽電池のエネルギー変換効率 η は、それぞれに対応する比較例1～比較例6の色素増感型太陽電池のエネルギー変換効率 η よりも高い値を示すことが確認された。

【0117】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、

光電極を構成する半導体電極内の増感色素の吸着量を十分に確保することが可能となる。また、半導体電極内の反応サイトへの反応物質の供給を迅速に行うことができる。したがって、本発明によれば、優れた光電変換効率を有する光電極を構成することができる。また、この光電極を用いることにより、優れたエネルギー変換効率を有する色素増感型太陽電池を構成することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の光電極の好適な一実施形態を示す模式断面図である。

【図2】図1に示した領域100の部分の模式拡大断面図である。

【図3】図1に示した光電極を備えた色素増感型太陽電池を示す模式断面図である。

【図4】図1に示した光電極の半導体電極の内部構造の他の形態を示す模式断面図である。

【図5】図1に示した光電極の半導体電極の内部構造の更に他の形態を示す模式断面図である。

【図6】図1に示した光電極の半導体電極の内部構造の更に他の形態を示す模式断面図である。

【図7】図1に示した光電極の他の実施形態を示す模式

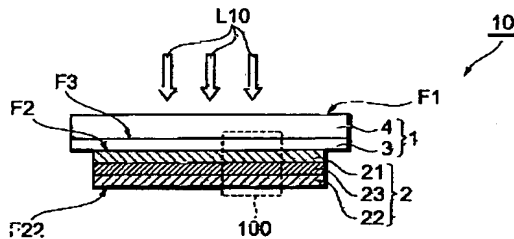
断面図である。

【図8】図1に示した光電極の半導体電極の内部構造の更に他の形態を示す模式断面図である。

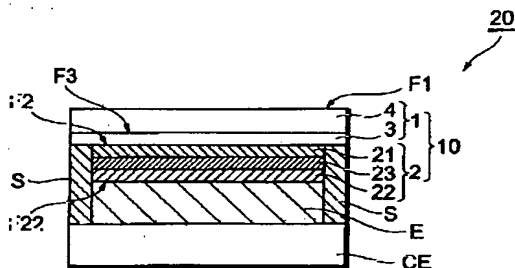
【符号の説明】

1…透明電極、2…半導体電極、3…透明導電膜、4…基板、10、11、12、13、14…光電極、20…色素増感型太陽電池、21…最内部の層、22…最外部の層、63…内部層、100…光電極10の部分領域、CE…対極、E…電解質、F1、F2、F3、…受光面、F22…半導体電極2の裏面、L10…入射光、P1…酸化物半導体粒子、P2…増感色素、P3…酸化物半導体粒子、P4…酸化物半導体粒子、R21、R22…細孔（空隙）部分、S…スペーサー。

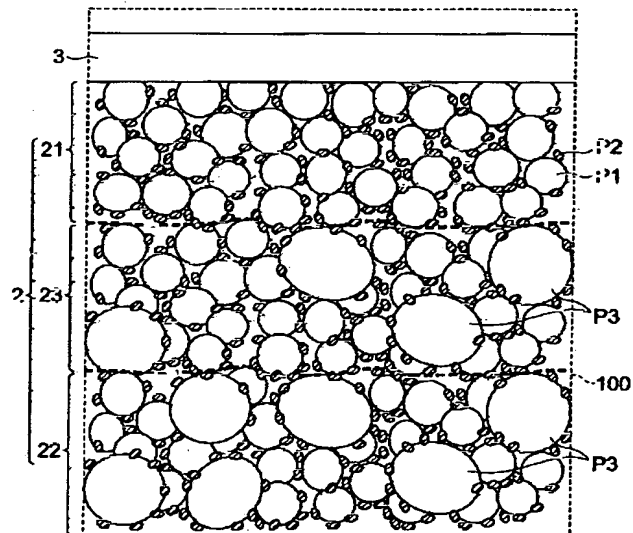
【図1】



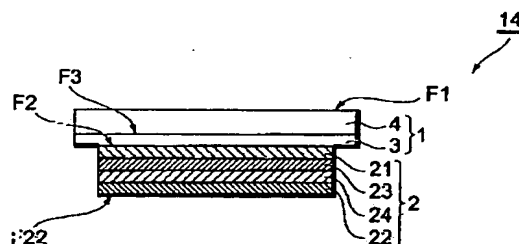
【図3】



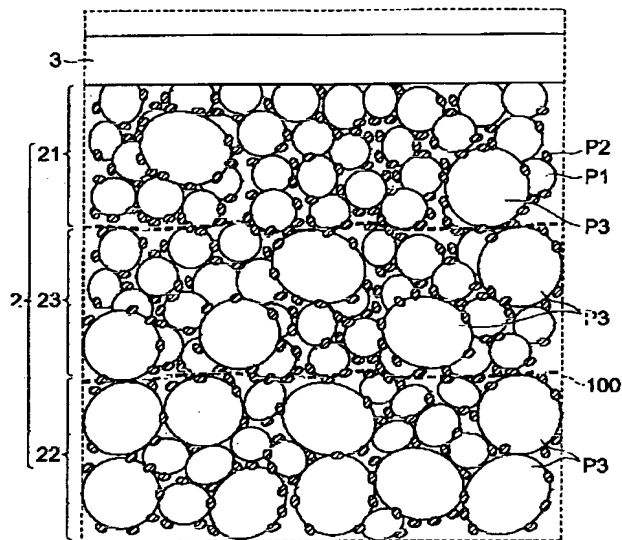
【図2】



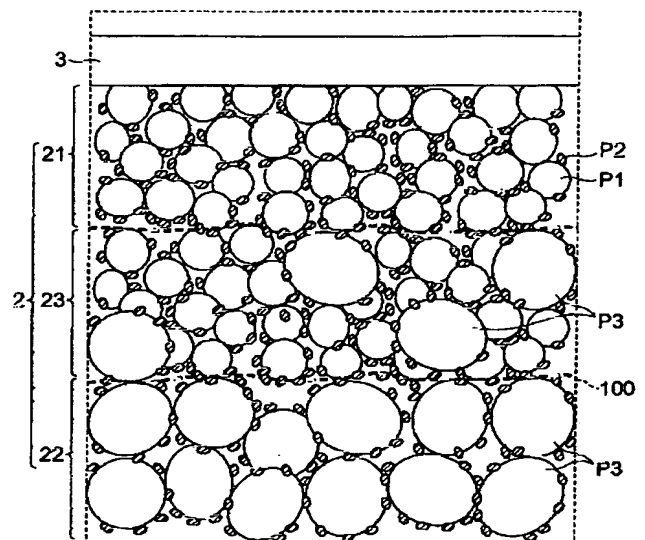
【図7】



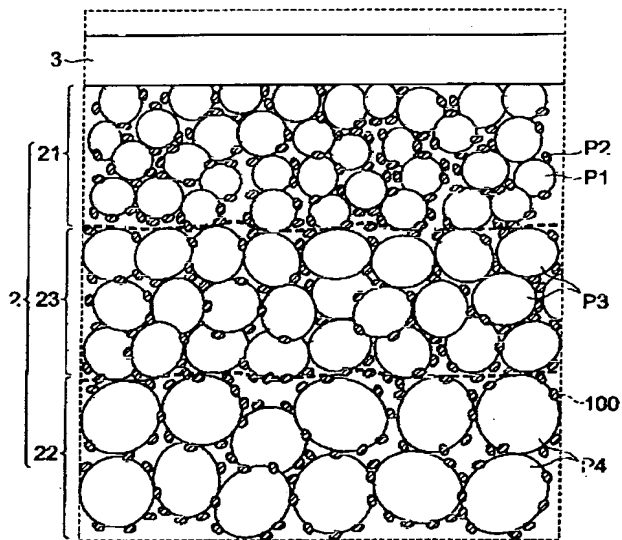
【図4】



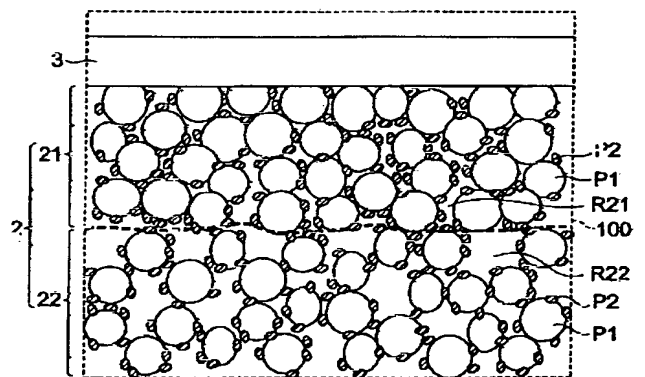
【図5】



【図6】



【図8】



フロントページの続き

- (72)発明者 月ヶ瀬 あずさ
愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番
地の1 株式会社豊田中央研究所内
- (72)発明者 稲葉 忠司
愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番
地の1 株式会社豊田中央研究所内
- (72)発明者 東 博純
愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番
地の1 株式会社豊田中央研究所内

- (72)発明者 元廣 友美
愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番
地の1 株式会社豊田中央研究所内
- (72)発明者 豊田 竜生
愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地 アイシ
ン精機株式会社内
- (72)発明者 中島 淳二
愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地 アイシ
ン精機株式会社内

(特 5) 102-352870 (P2002-352870A)

(72)発明者 佐野 利行
愛知県刈谷市朝日町2丁目1番地 アイシ
ン精機株式会社内

Fターム(参考) 5F051 AA14 CB13 EA04 FA01 FA03
FA18 GA03
5H032 AA06 AS16 CC14 EE02 EE07
EE16 HH04